

文章编号:1004-7220(2012)03-0312-05

# 基于 MATLAB 的海量人体运动学数据批处理方法

尚 鹏<sup>1</sup>, 白雪岭<sup>2</sup>, 张 柳<sup>3</sup>, 李慧奇<sup>3</sup>

(1. 深圳清华大学研究院, 深圳 518057; 2. 中国科学院 深圳先进技术研究院, 深圳 518005; 3. 深圳大学 光电子学研究所, 深圳 518060)

**摘要:** **目的** 开发一种基于 MATLAB 的海量人群人体运动学数据批处理方法。**方法** 首先, 基于 MATLAB 批读取运动捕捉系统测量的人体行为运动原始标记点坐标数据, 对其进行插值处理, 剔除误差点; 其次, 构建黏贴于人体上相邻刚体的连体基, 将其作为相应关节运动学计算的刚体参考基和连体基; 最后, 基于刚体运动学、计算刚体姿态的基本描述和方向余弦阵, 计算各关节的内展/屈/伸、内外旋角位移、角速度和角加速度。**结果** 本文以上楼梯和深蹲为例, 应用海量人体运动学数据批处理方法对人体下肢行为运动的关节运动学进行分析计算, 验证了该方法的准确性和有效性。**结论** 基于 MATLAB 的海量人群人体运动学数据批处理方法能够快速、准确地对海量人群人体运动学数据进行处理, 为人体测量学、人机工程学等统计科学提供了分析工具。

**关键词:** 海量人群; 运动学; 批处理; 运动捕捉; 人体测量; 人机工程学

**中图分类号:** R 318.01 **文献标志码:** A

## Batch process method for kinematics data of mass population based on MATLAB

SHANG Peng<sup>1</sup>, BAI Xue-ling<sup>2</sup>, ZHANG Liu<sup>3</sup>, LI Hui-qi<sup>3</sup> (1. *Research Institute of Tsinghua University in Shenzhen, Shenzhen 518057, China*; 2. *Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China*; 3. *Institute of Optoelectronics, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China*)

**Abstract: Objective** To develop a batch process method for kinematics data of mass population based on MATLAB. **Methods** Based on MATLAB, the original coordinate data of markers from motion capture system were first batch-read with interpolation processing for eliminating the error points. The body-fixed base of contiguous rigid body attached on human body was then constructed as the reference base and body-fixed base of relative joint kinematics computing. The flexion/extension, abduction/adduction, internal and external rotation angular displacement, angular velocity and angular acceleration of joints were obtained based on the rigid body kinematics, the basic description of rigid body posture and the direction cosine matrix. **Results** Taking climbing upstairs and squatting as samples, the joint kinematics of lower extremity were analyzed and calculated by the batch process method for kinematics data of mass population based on MATLAB to prove the effectiveness and accuracy of the method. **Conclusions** The batch process method for kinematics data of mass population based on MATLAB was proved to be effective and accurate, and can be provided as a statistical analysis tool for anthropometry, human engineering, etc.

**Key words:** Mass population; Kinematics; Batch process; Motion capture; Anthropometry; Human engineering

收稿日期:2011-08-01; 修回日期:2011-09-26

基金项目:国家自然科学基金国际(地区)合作交流项目(30810103908)。

通讯作者:尚鹏,副研究员,E-mail:shangpeng69@hotmail.com。

人工关节置换术已获得普遍推广,但置换所用人工关节主要采用 Zimmer、Stryker、Dupuy 等欧美著名公司产品,这些人工关节产品是基于西方人的解剖特点和生活习惯设计的。由于亚洲人与西方人在人种和文化方面的不同,导致髌、膝关节在解剖形态、日常行为动作以及人体生物力学特性等方面存在着较为显著的差异。要获取亚洲人种典型行为动作的标准描述、髌与膝关节相应的姿态位置统计学参数,以及具有亚洲人种特征的关节运动学参数统计学分布,需对海量的不同性别、年龄段亚洲人的下肢行为运动(如:上/下楼梯、蹲、跪和盘腿坐等)进行测量。通过运动捕捉系统精确地对黏附于人体特定解剖位置的标记点的监视和跟踪来完成志愿者下肢行为运动测量,可以得到黏附于人体上的标记点的系列空间坐标数据<sup>[14]</sup>。然而,基于海量的行为运动测量的原始标记点坐标数据计算人体下肢关节的运动学参数并进行统计分析,必将消耗大量的人力、物力资源,同时也将耗费大量的时间,故开发一种高效、准确的海量人群人体运动学数据批处理方法是项目必须要解决的问题。

本文基于 MATLAB 开发了一种可以成批读取运动捕捉系统测量的人体运动原始标记点坐标数据。这种基于 MATLAB 的海量人群人体运动学数据批处理方法将为项目的顺利进行提供一种高效、准确的工具,同时也可对人体测量学、人机工程学等需海量人群人体运动学统计学科提供分析工具。

## 1 下肢行为运动捕捉

### 1.1 对象

测试志愿者 55 人,其中男性 35 人,女性 20 人,均为华南人,深圳大学在校学生,年龄 22 ~ 25 岁,身高 150 ~ 185 cm(平均 167.00 cm),体重 41 ~ 91 kg(平均 59.45 kg)。

### 1.2 仪器

项目采用 NDI 运动捕捉系统(Canada NDI)<sup>[5]</sup>对人体下肢行为运动进行运动捕捉。

### 1.3 测量过程

测量志愿者下肢各解剖部位人体测量学数据。针对下肢行为运动相关的 7 个解剖部位(骨盆、右大腿、右小腿、右脚、左大腿、左小腿、左脚),制作 7 个适合不同解剖部位的带有 4 个标记点的刚体(表

征刚体空间 6 个自由度的运动参数),相邻标记点连线互相垂直,分别定义为: Pelvis(骨盆), RThigh(右大腿), RShank(右小腿), RFoot(右脚), LThigh(左大腿), LShank(左小腿), LFoot(左脚)。另外,人体在运动过程中,下肢肌肉会有较大的膨胀或者变形,例如下蹲过程中,由于挤压以及肌肉收缩,大腿、小腿部位会产生较大的变形;因此,刚体黏贴原则为在不妨碍运动的前提下,将刚体黏贴于相应解剖部位运动变形较小的部位,避开关节挤压变形以及肌腹(肌肉收缩膨胀)处,减少因皮肤变形而带来的测量误差。并针对由于遮挡摄像头无法采集,或不便黏贴标记点的特征解剖部位,采用虚拟工具进行虚拟标记点设定(虚拟标记点设置是 NDI 运动测量系统具备的一项功能),在测试前用专用的虚拟标记点工具设置相对于特定刚体的虚拟标记点。首先,利用工具在人体上需要设定虚拟标记点的位置选取该点,系统根据捕捉到的工具坐标和刚体坐标,自动计算该点与相对刚体的空间关系,即该点随刚体空间运动,在刚体坐标系中坐标不变。

根据 NDI 系统设定,虚拟标记点与选定相应刚体的相对位置固定不变),共定义 12 个虚拟标记点:①左踝关节内/外髌;②右踝关节内/外髌;③左膝关节内/外髌;④右膝关节内/外髌;⑤盆骨两侧髌前上棘;⑥左/右股骨大转子。

根据各标记点相应位置定义标记点的名称,以便 MATLAB 读写。刚体黏附位置以及虚拟标记点位置分别如图 1 所示。

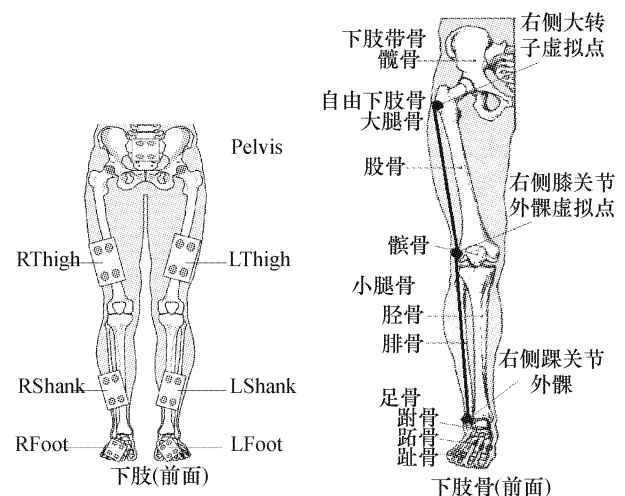


图 1 各刚体以及虚拟标记点位置

Fig.1 Rigid bodies and virtual markers on human body

经准备活动后,通过运动捕捉系统采集志愿者行为动作的原始标记点坐标数据,测量获得的刚体标记点及虚拟标记点的三维空间坐标原始数据保存为相应名称的 xls 格式文件中。志愿者上楼梯运动捕捉现场如图 2 所示。



图2 志愿者上楼梯运动捕捉  
Fig.2 Motion capture during upstairs climbing

## 2 数据处理方法

### 2.1 批读取文件

实验测量获得的海量人体行为运动的标记点空间坐标数据均被保存在相对应的 Excel 文件中,例如 gait001.xls 中保存志愿者 001 的步态中的下肢运动 marker 坐标数据。程序通过 MATLAB 与 Excel 的宏关联 exlink.xla 插件,使用数据读取函数 (`[num, txt, raw, X] = xlsread(filename, sheet, range)`)/数据写入函数 (`[status, message] = xlswrite(filename, M, sheet, range)`)对下肢行为运动的坐标数据进行读写。MATLAB 与 Excel 宏关联使得 Excel 里的数据在 MATLAB 编译环境下实现无缝连接,实现对 Excel 数据快速、高效处理。

### 2.2 数据预处理

NDI 运动捕捉系统是光学式运动捕捉系统,在行为运动测量过程中,由于遮挡等原因会造成部分标记点坐标数据缺失,xlsread 函数将这些空白读入后,在 MATLAB 中用非数 NaN 表示,使得曲线不连续,数据缺失点需要修补,确保数据的完整性。因此,首先需对缺失的数据进行插值修补。选择函数 `yi = interp1([x,] y, xi, [method], ['extrap'], [extrapval])` 进行插值修补,其中,method 选项选择 'spline' 进行 3 次样条函数插值,使得插值获得的曲

线二阶连续可导,确保基于此计算获得的角位移、角速度、角加速度随时间变化曲线连续、准确。

### 2.3 下肢骨骼解剖学参数计算

原始数据经预处理后,可根据虚拟点坐标计算下肢骨骼解剖学参数,下面以股骨长度计算为例:

$$C_{SRfemur} = (C_{VRgtrochanter} + C_{Offset}) \quad (1)$$

$$C_{ERfemur} = (C_{VRLknee} + C_{VRMKnee})/2 \quad (2)$$

$$L_{Rfemur} = \sqrt{(X_{SRfemur} - X_{ERfemur})^2 + (Y_{SRfemur} - Y_{ERfemur})^2 + (Z_{SRfemur} - Z_{ERfemur})^2} \quad (3)$$

式中: $C_{SRfemur}$ 、 $C_{ERfemur}$ 、 $C_{VRgtrochanter}$ 、 $C_{VRMKnee}$ 、 $C_{VRLknee}$  分别为右股骨头中心坐标、右膝关节中间点坐标、右股骨大转子坐标、右膝内侧虚拟点坐标、右膝外侧虚拟点坐标; $C_{Offset}$  为股骨大转子距离股骨头中心偏移距离; $L_{Rfemur}$  为右股骨长度。

### 2.4 关节运动学计算

关节运动学的计算可以等效为相对刚体之间的刚体空间运动学<sup>[6]</sup>计算。例如,右髋关节运动学计算可以等效为右大腿刚体相对于骨盆刚体的运动学计算,右膝关节运动学计算可以等效为右小腿刚体相对于右大腿刚体的运动学计算,右踝关节运动学计算可以等效为右足刚体相对于右小腿刚体的运动学计算。

在人体运动过程中,黏附于人体上的刚体随着人体的运动,表现为刚体的空间一般运动,其方法适合于人体各关节运动学计算。下面以右髋关节运动学计算为例:刚体 Pelvis 和刚体 RThigh 表现为刚体的空间一般运动,图 3 所示为某一时刻黏附于骨盆和右大腿的两个相邻刚体的空间位置。

以刚体 Pelvis 上标记点 PA 为基点 O 构造刚体 Pelvis 的连体基:  $e^r = [x^r \ y^r \ z^r]^T$ , 以刚体 RThigh 上 marker 点 RTA 为基点 O' 构造刚体 RThigh 的连体基:  $e^b = [x^b \ y^b \ z^b]^T$ , 如图 3 所示。图中:PA、PB、PC 和 PD 分别为刚体 Pelvis 上的标记点,RTA、RTB、RTC 和 RTD 分别为刚体 RThigh 上的标记点。其中,取 3 个标记点(例如针对 Pelvis 刚体,取 PA、PB、PC 3 个标记点)定义刚体的连体基。另外,PD 作为备选,避免测试过程中,某个标记点由于遮挡、脱落等原因造成的大部分数据缺失或失真而不能程序进行插补的情况。将  $e^r$  和  $e^b$  分别作为髋关节运动学计算的参考基和连体基。则刚体姿态的基本描述为

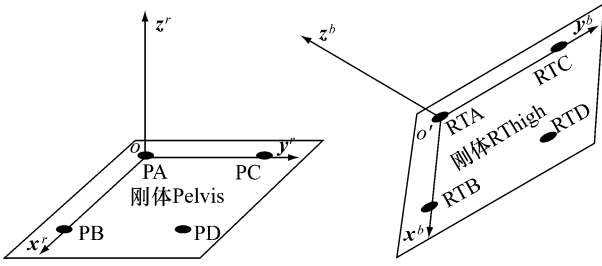


图3 刚体 Pelvis、RThigh 及其连体基  $e^r$  和  $e^b$   
 Fig.3 Pelvis rigid-body, RThigh rigid-body and their reference bases

$$A^{rb} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x^r \cdot x^b & x^r \cdot y^b & x^r \cdot z^b \\ y^r \cdot x^b & y^r \cdot y^b & y^r \cdot z^b \\ z^r \cdot x^b & z^r \cdot y^b & z^r \cdot z^b \end{pmatrix} \quad (4)$$

刚体姿态的基本描述可由刚体的位形坐标阵表示,  $q = (x \ y \ z \ \psi \ \theta \ \varphi)^T$ 。其中,  $x, y, z$  分别代表 3 个方向上的位移, 刚体欧拉角  $q = (\psi \ \theta \ \varphi)^T$  可表征 3 个角度参数, 其中,  $\psi, \theta$  和  $\varphi$  分别代表刚体的进动角、章动角和自旋角(见图 4)。则刚体 RThigh 相对于参考基 Pelvis 的方向余弦阵为

$$\bar{A}^{rb} = \begin{bmatrix} c\psi c\varphi - s\psi c\theta s\varphi & -c\psi s\varphi - s\psi c\theta c\varphi & s\psi s\theta \\ s\psi c\varphi - c\psi c\theta s\varphi & -s\psi s\varphi - c\psi c\theta c\varphi & -c\psi s\theta \\ s\theta s\varphi & s\theta c\varphi & c\theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,  $c$  代表余弦  $\cos$ ,  $s$  代表正弦  $\sin$ 。

由式(4)和(5)可计算  $q = (\psi \ \theta \ \varphi)^T$ 。根据欧拉角定义(见图 4)以及空间几何知识, 可以对髋关节运动中的关节角度(其中, 关节屈/伸角为刚体绕  $x$  轴旋转角度; 关节内/外展角为刚体绕  $z$  轴旋转

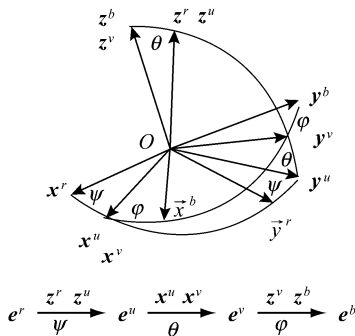


图4 欧拉角定义(3次有限旋转实现刚体空间旋转运动)  
 Fig.4 Definition of the Euler Angle

角度; 关节内/外旋角为刚体绕  $y$  轴旋转角度) 进行求解。关节屈/伸角 =  $2\arcsin(\cos \varphi \sin(\theta/2))$ ; 关节内/外展角 =  $\psi + \arctan(\tan \varphi / \cos \theta)$ ; 关节内/外旋角 =  $2\arcsin(\sin \varphi \sin(\theta/2))$ 。对其进行一阶求导与二阶求导, 可计算髋关节的屈/伸、内/外展、内/外旋角速度和角加速度。

### 3 结果

基于上述介绍方法, 运动捕捉系统测量获得的人体行为运动原始标记点坐标数据经 3 次样条函数插值处理后, 构建粘贴于骨盆和右大腿的相邻刚体的连体基, 将其作为关节运动学计算的参考基和连体基  $e^r$  和  $e^b$ ; 基于刚体运动学, 计算刚体姿态的基本描述, 计算出人体行为运动下的各关节的内/外展、屈/伸、内/外旋角度、角速度和角加速度。图 5、6 为应用该方法对个性化的志愿者进行运动学分析示例。其中, 图 5 为两个志愿者在上楼梯时右侧膝关节的屈/伸角位移。图 6 为志愿者深蹲时右髋和右膝关节屈/伸角位移。

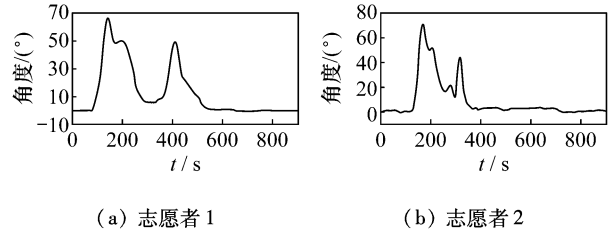


图5 上楼梯时右膝关节屈/伸角位移  
 Fig.5 Flexion/extension angular displacement of right knee during upstairs climbing (a) Volunteer 1, (b) Volunteer 2

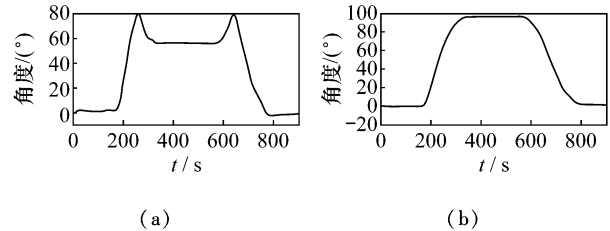


图6 深蹲时右髋(a)和右膝(b)屈/伸角位移  
 Fig.6 Flexion/extension angular displacement of right hip (a) and right knee (b) during squatting

另外, 本文应用基于 MATLAB 的海量人群人体运动学数据批处理方法, 对基于华南人特征的人体日常生理姿态的下肢关节运动进行了统计学分析计

算。以华南人蹲坐姿态为例,应用该方法经过快速的计算,可以得到55名志愿者在蹲坐时关节屈曲极限角度的平均值和标准差(见图7)。

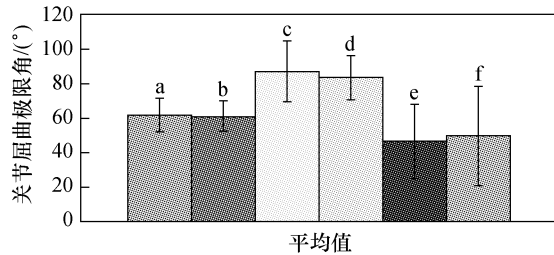


图7 55名华南人蹲坐时双侧髋、膝、踝关节屈曲极限角度 (a-人体右侧髋关节,b-人体左侧髋关节,c-人体右侧膝关节,d-人体左侧膝关节,e-人体右侧踝关节,f-人体左侧踝关节)

Fig.7 The maximum flexion angle of hip, knee and ankle of 55 South Chinese people during squatting

#### 4 讨论

随着社会的发展,人体测量学、人体工程学等学科在国防、工业、医疗卫生、服装等领域得到了广泛的应用。这些与人体姿态、运动相关的设计需要对海量人群姿态及行为运动进行统计分析。

现已有各种软件可对人体运动学数据进行处理。例如,Visual 3D<sup>[7]</sup>可以很好地对人体行为运动数据进行处理,同时也可计算关节运动数据,但其只能逐个地进行手工操作处理,不便海量数据的处理。本文开发了一种基于MATLAB的海量人群人体运

动力学数据批处理方法,可以批读取运动捕捉系统测量获得的标记点坐标数据,构建关节相邻刚体的连体基,作为关节运动学计算的参考基和连体基;基于刚体运动学、刚体姿态的基本描述,可方便地计算出髋关节的内外展、屈/伸、内外旋角度、角速度和角加速度。这种方法能够高效、准确地对海量人群人体运动学数据进行相应的处理与分析,解决了海量人体运动学统计分析的效率与速度问题。

#### 参考文献:

- [1] Selfe J, Hardaker N, Thewlis D, *et al.* An accurate and reliable method of thermal data analysis in thermal imaging of the anterior knee for use in cryotherapy research [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2006, 87(12): 1630-1635.
- [2] Zhou HY, Hu HS. Human motion tracking for rehabilitation-A survey [J]. *Biomed Sign Proc Control*, 2008, 3(1): 1-18.
- [3] 王洪生,白雪岭,张希安,等. 人体行走过程中上肢运动测量及生物力学特征分析[J]. *上海交通大学学报*, 2009, 43(8): 1302-1306.
- [4] 唐刚,张希安,季文婷,等. 坡面步行中青年女性下肢关节角及肌肉激活度[J]. *医用生物力学*, 2011, 26(2): 158-162.  
Tang G, Zhang XA, Ji WT, *et al.* Joint angles and muscle activations in the lower limb of young women during slope walking [J]. *J Med Biomech*, 2011, 26(2): 158-162.
- [5] [Http://www.ndigital.com/lifesciences/certus-motioncapture-system.php](http://www.ndigital.com/lifesciences/certus-motioncapture-system.php).
- [6] 林文惠. 刚体运动学的几何研究 [J]. *力学与实践*, 2005, 27(5): 71-72.
- [7] [Http://www.c-motion.com/products/visual3d.php](http://www.c-motion.com/products/visual3d.php).